

## Загальні питання технологій збагачення

ильменита, кремнезема. Плотность этой руды – 2,6 т/м<sup>3</sup>. По прочности руда средней крепости, не шламуется. В магнитных полях с магнитной индукцией 0,8 Тл не проявляет магнитные свойства.

4. Гравитационное обогащение измельченной и обесшламленной руды позволяет получить железорудный концентрат с содержанием триоксида железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  более 62,0%, что удовлетворяет требованиям для товарных продуктов, отгружаемых на цементные заводы.

5. Обогащение гравитационного концентрата в высокоинтенсивном магнитном поле с магнитной индукцией 0,8 Тл позволяет повысить качество железорудного концентрата по содержанию триоксида железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  до 80%.

6. Величина магнитной индукции в условиях ВИМС на уровне 0,8 Тл является оптимальным, при меньшем значении этого параметра снижается извлечение железа, при его повышении снижается качество концентрата.

7. Дальнейшее повышение качества концентрата достигается за счет обжига магнитного продукта ВИМС в окислительной среде при температуре 500 °С в течение 1 часа. Содержание триоксида железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  после обжига составило 89,5%.

### Благодарности

Автор выражает искреннюю признательность специалистам – обогатителям А. Иванченко, Д. Матийчук и Д. Анищенко за практическое участие и ценные советы при выполнении настоящей работы.

© Кирнарский А.С., 2018

Надійшла до редколегії 28.08.2018 р.

Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим

УДК 622.778.4

**И.К. МЛАДЕЦКИЙ**, д-р техн. наук,

**А.А. БЕРЕЗНЯК**, канд. техн. наук, **Е.А. БЕРЕЗНЯК**,

**Я.Г. КУВАЕВ**, канд. техн. наук,

(Украина, Днепр, Государственное ВНЗ Национальный технический университет «Днепропетровская политехника»)

## ЭФФЕКТЫ РАЗМАГНИЧИВАНИЯ ПЕРЕД РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫМИ ОПЕРАЦИЯМИ

Частицы магнетита обладают остаточной намагниченностью, поэтому образуют флоккулы при воздействии магнитного поля во время магнитной сепарации. Немагнитные частицы пустой породы защемляются внутри флоккулы и удерживаются в ней за счет сил трения, снижая качество концентрата. При движении флоккулы относительно среды могут быть удалены только те немаг-

нитные частицы, которые находятся вблизи поверхности флокулы.

Если же флокулы в пульпе переформируются, например, переменным магнитным полем, то образуется новая поверхность после каждого переформирования, и вымывание немагнитных частиц увеличивается. В результате размагничивания частиц магнетита образуется однородная суспензия, магнитные частицы которой после попадания в магнитное поле опять флокулируют, но расстояние между немагнитными частицами уже больше, чем при первичном флокулообразовании, соответственно, в тело флокулы будет захвачено меньше немагнитных частиц, и в результате показатели разделения должны улучшаться.

Таким образом, размагничивание целесообразно выполнять не только перед немагнитными способами разделения, но и перед магнитными, при перечистках или контрольных операциях, т.е. размагничивание целесообразно перед любой операцией разделения.

В пользу вышеизложенного говорит экспериментальное исследование осаждения частиц в неподвижной воде. Намагниченные частицы осаждаются довольно быстро, а размагниченные медленнее. Наблюдается резкая граница между слоем магнитной (нижний, темный слой) и немагнитной массы (верхний светлый слой). Плотность магнетита значительно превышает плотность нерудных минералов, поэтому сначала и с большей скоростью оседают плотные магнетитсодержащие частицы, а затем уже раскрытые нерудные зерна.

Немагнитные частицы попадают во флокулы случайным образом, следовательно, захват их может характеризоваться определенной вероятностью. Флокуляция заключается в интенсивном движении магнитных частиц друг к другу. На своем пути они могут встретить немагнитную частицу, и вероятность встречи зависит от концентрации немагнитных частиц.

Распределение частиц в пульпе подчинено закону Пуассона и может быть описано экспоненциальной функцией:

$$P_{BCT} = 1 - \exp(-n),$$

где  $n$  – количество немагнитных частиц на пути движения магнитных. Величина  $n$  определяется отношением:  $n = \frac{r_M}{r_H}$ , где  $r_M$ ,  $r_H$  – расстояние между магнитными и немагнитными частицами до наложения магнитного поля. Обе величины определяют по формулами:

$$r_M = \bar{d} \cdot \left( \sqrt[3]{\frac{\pi}{6 \cdot P_M \cdot p}} - 1 \right), \quad r_H = \bar{d} \cdot \left( \sqrt[3]{\frac{\pi}{6 \cdot P_H \cdot p}} - 1 \right),$$

где  $P_M$ ,  $P_H$  – соответственно содержание сильномагнитного материала и нерудных зерен в пульпе;  $p$  – содержание твердой фазы в пульпе.

Немагнитная частица будет увлечена во флокулу, если с ней столкнется

достаточное количество  $K$  магнитных частиц, причем немагнитная частица получит достаточное количество энергии для перемещения к центру флокуляции. В этом случае вероятность захвата составит:

$$P_{\text{ЗАХ}} = 1 - P_{\text{ВСТ}}^K.$$

Величина  $K$  зависит от соотношения количества магнитных и немагнитных частиц в пульпе в сфере некоторого радиуса  $r$  от поверхности центра флокуляции. Количество магнитных частиц в пределах этой сферы составит:

$$n_M = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left( \frac{\bar{r} + 0,5 \cdot d_\phi}{r_M + d_M} \right)^2, \quad (1)$$

где  $d_\phi$  – диаметр сферы флокуляции;  $r_M$  – расстояние между магнитными частицами;  $d_M$  – размер магнитных частиц.

Все магнитные частицы притягиваются к центру флокуляции (рис. 1).

Немагнитные частицы, с которыми может произойти соударение магнитных частиц, находятся на несколько меньшем расстоянии  $r_1$ , чем  $\bar{r}$ , а те, которые находятся в непосредственной близости от поверхности флокулы, могут подвергнуться большему количеству соударений, максимальное число которых зависит от отношения магнитных частиц, находящихся в объеме:

$$V_\phi = \frac{\pi}{6} \cdot \left( \frac{\bar{r} + d_\phi}{2} \right)^2$$

к количеству частиц, расположенных около поверхности центра флокуляции:

$$\frac{\pi \left( \bar{r} + \frac{d_\phi}{2} \right)^3 \cdot (r_H + d_H)^2}{K_{\text{МАХ}} \cdot l \cdot (r_M + d_M)^3 \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (d_H + d_\phi)^2} = \frac{4,5 \cdot (2 \cdot r + d_\phi)^3 \cdot (r_H + d_H)^2}{(r_M + d_M)^3 \cdot (d_H + d_\phi)^2},$$

где  $r_H$  – расстояние между немагнитными частицами размера  $d_H$ .

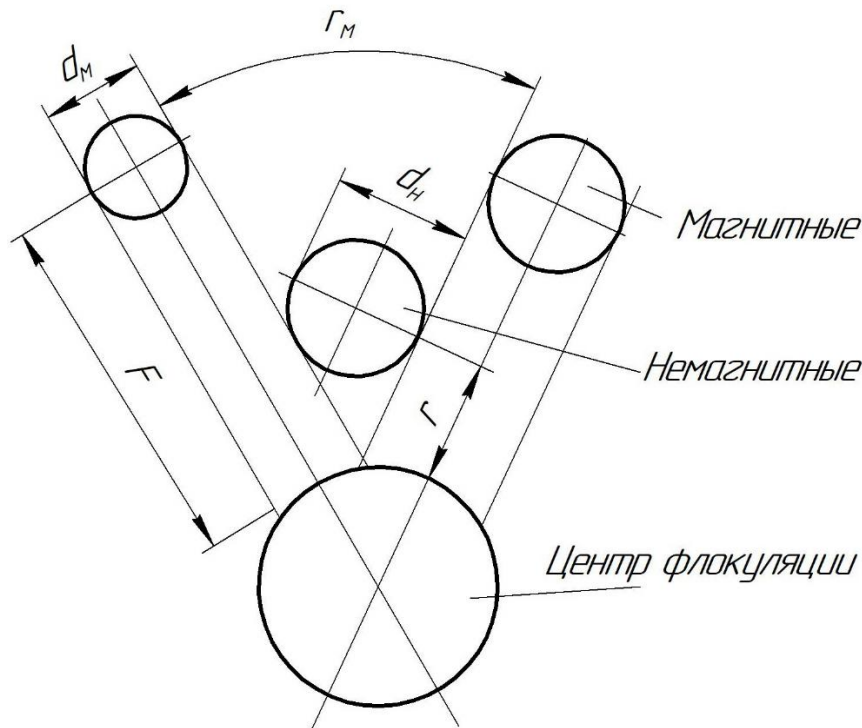


Рис. 1. Схема захвата немагнитных частиц при флокуляции

В общем виде:

$$K = \frac{4,5 \cdot (2 \cdot \bar{r} - 2 \cdot r + d_\phi)^3 \cdot (r_H + d_H)^2}{(r_M + d_M)^3 \cdot (d_H + d_\phi)^2}, \quad (2)$$

где  $r$  – текущее расстояние от поверхности центра флокуляции. Среднее значение количества частиц определяется выражением:

$$\bar{K} = \frac{1}{r} \cdot \int_0^{\bar{r}} K(r) dr.$$

Этим значением и будем пользоваться в расчетах.

В выражении (2) можно произвести некоторые упрощения. Величины  $d_M$ ,  $d_H$  принадлежат одной и той же совокупности значений, характеризующейся функцией распределения и средним значением крупности  $\bar{d}$ . Поэтому вместо  $d_M$ ,  $d_H$  примем  $\bar{d}$ . Тогда:

$$K = \frac{4,5 \cdot (2 \cdot \bar{r} - 2 \cdot r + d_\phi)^3 \cdot (r_H + \bar{d})^2}{(r_M + \bar{d})^3 \cdot (d_H + \bar{d})^2}.$$

Определим теперь энергию, получаемую немагнитной частицей, на основании второго закона Ньютона:

$$\frac{dU_H}{dt} = F_\mu = \frac{18 \cdot \mu \cdot U_H}{\delta_H \cdot d_H^2},$$

где  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости;  $\delta_H$ ,  $d_H$ ,  $U_H$  – соответственно плотность, размер и скорость немагнитной частицы. Таким образом, устанавливаем, что:

$$\frac{dU_H}{U_H} = \frac{18 \cdot \mu \cdot dt}{\delta_H \cdot d_H^2}.$$

Решение этого уравнения при начальных условиях  $t=0$ ,  $U=U_H$ ;  $t=\infty$ ,  $U=0$ , имеет вид:

$$U_H = U_M \cdot \exp\left(-\frac{18 \cdot \mu \cdot t}{\delta_H \cdot d_H^2}\right).$$

Величина  $U_M$  определяется силой взаимодействия флокулирующих частиц из условия  $F_M = F_\mu$ . Отсюда получаем:

$$U_M = \frac{F_M \cdot \delta_M \cdot d_M^2}{18 \cdot \mu}.$$

Немагнитная частица достигнет поверхности флокулы, если:

$$t \leq t_M \tag{3}$$

где  $t_M$  – среднее время движения магнитных частиц от границы к поверхности флокулы:  $t_M = \frac{\bar{r}}{U_M}$ ;  $U_M$  – средняя скорость магнитных частиц при флокуляции.

Эта последняя величина зависит от количества ударов магнитных частиц за период флокуляции. Среднее время между двумя соседними столкновениями  $t' = \frac{t_M}{K}$ , следовательно:

$$\bar{U}_H = \frac{1}{t'} \cdot \int_0^{t'} U_M \cdot \exp\left(-\frac{18 \cdot \mu \cdot t}{\delta_H \cdot d_H^2}\right) dt.$$

Теперь из условия (3) находим такое расстояние, в пределах которого возможен захват немагнитных частиц:

$$\bar{r}_H = \bar{r} \cdot \frac{\bar{U}_H}{\bar{U}_M}.$$

Будем называть такое расстояние шагом флокуляции. Количество нерудных зерен, захваченных во флокулы за один шаг флокуляции, составит:

$$P_{H33AX} = P_{H3} \cdot P_{3AX} \cdot p \cdot \left( \frac{\bar{r}_H - d_\phi}{\bar{r} - d_\phi} \right)^3.$$

Если принять:

$d_\phi = 2 \text{ мм}$ ;  $\bar{r} = 2 \text{ мм}$ ;  $\bar{r}_H = 1 \text{ мм}$ ;  $p = 0,15$ ;  $P_{H3} = 0,1$ ;  $\bar{d} = 0,08$ ;  $r_H = 0,08 \text{ мм}$ ;  $r_H = \bar{r}$ ;  $P_M = 0,6$ ;  $P_H = 0,4$ , то количество захваченного немагнитного материала составит  $P_{H33AX} = 0,005$ , и на следующем шаге флокуляции будет уменьшаться.

Предположим, что разделение происходит с переформированием флокул.

Уменьшение концентрации немагнитных частиц за один цикл переформирования определится содержанием их в объеме флокулы:

$$n_\phi = \frac{V_\phi \cdot p_H}{d^3} = \frac{\pi \cdot a^3 \cdot p_H}{6 \cdot d^3}$$

и содержанием на ее поверхности:

$$n_\Pi = \frac{S_{\text{пов}} \cdot p_H}{d^2} = \frac{\pi \cdot a^2 \cdot p_H}{4 \cdot d^2}.$$

Количество оставшегося немагнитного продукта за один цикл переформирования составит:

$$p_H = 1 - \frac{n_\Pi}{n_\phi} = \frac{\frac{\pi \cdot a^2 \cdot p_H}{4 \cdot d^2}}{\frac{\pi \cdot a^3 \cdot p_H}{6 \cdot d^3}} = 1 - \frac{1,5 \cdot d}{a}.$$

Таким образом, соотношение для количества немагнитного материала, оставшегося во флокуле на  $i$ -м цикле переформирования, составит:

$$p_{i+1} = p_i \cdot \left( 1 - \frac{1,5 \cdot d}{a} \right).$$

Т.е. изменение концентрации немагнитного продукта есть постоянная величина:

$$\frac{dp}{di} = p_i \cdot \left( \frac{1,5 \cdot d}{a} \right).$$

Откуда

$$p_i = p_0 \cdot \exp\left(-\frac{1,5 \cdot i \cdot d}{a}\right).$$

Решая это уравнение относительно количества переформирований, получаем:

$$i = \frac{a \cdot \ln\left(\frac{p_k}{p_0}\right)}{1,5 \cdot d}.$$

Для принятых условий это составляет 50-80 циклов переформирования в чистом потоке воды.

После первого приема сепарации в обогащенном продукте будет количество немагнитной фракции, равное:

$$P_{3AX} = P_M \cdot p_H = P_M \cdot P_H \cdot p.$$

Следовательно, процесс удаления немагнитных зерен можно представить в виде:

$$P_{3AX(i+1)} = P_{3AXi} \cdot (P_M \cdot p),$$

т.е. изменение их содержания во флокуле пропорционально концентрации частиц в пульпе, что определяется экспоненциальной зависимостью:

$$P_{3AXi} = P_{3AX0} \cdot \exp(-i \cdot P_M \cdot p).$$

Необходимое количество циклов сепарации и размагничивания найдем как:

$$i = \frac{\ln\left(\frac{P_{3AXk}}{P_{3AX0}}\right)}{-P_M \cdot p}.$$

Для стандартных условий магнитной сепарации количество циклов составит около 10. При этом содержание твердого  $p = 0,3$  содержание магнитной фракции в концентрате составит  $P_M = 0,95$ .

Итак, можно добиться высокого качества концентрата, используя магнитную сепарацию совместно с размагничиванием.

Поскольку величины  $P_M$  и  $P_H$  связаны между собой соотношением:

$$P_M + P_H = 1,$$

то произведение этих величин никогда не пересекает оси абсцисс и асимптотически стремится к этой оси при изменении соотношений между ними. Отсюда следует, что при малых значениях  $P_M$  получить практически нулевые потери ценного компонента с помощью магнитной сепарации возможно, а при больших значениях этого параметра всегда будет существовать отличная от нуля вероятность захвата немагнитных частиц, и получение чистых концентратов с помощью магнитной сепарации невозможно теоретически. Следовательно, необходимо исключить влияние частиц друг на друга, т.е. размагнитить их.

### **Список литературы**

1. Младецкий И.К. Оценка флокуляции сильномагнитного минерала в полях магнитных сепараторов // Физ.-техн. пробл. разраб. полезных ископаемых. – 1979. – № 6. – С. 101-106.

© Младецкий И.К., Березняк А.А., Березняк Е.А., Куваев Я.Г., 2018

*Надійшла до редколегії 03.09.2018 р.  
Рекомендовано до публікації к.т.н. К.А. Левченком*